

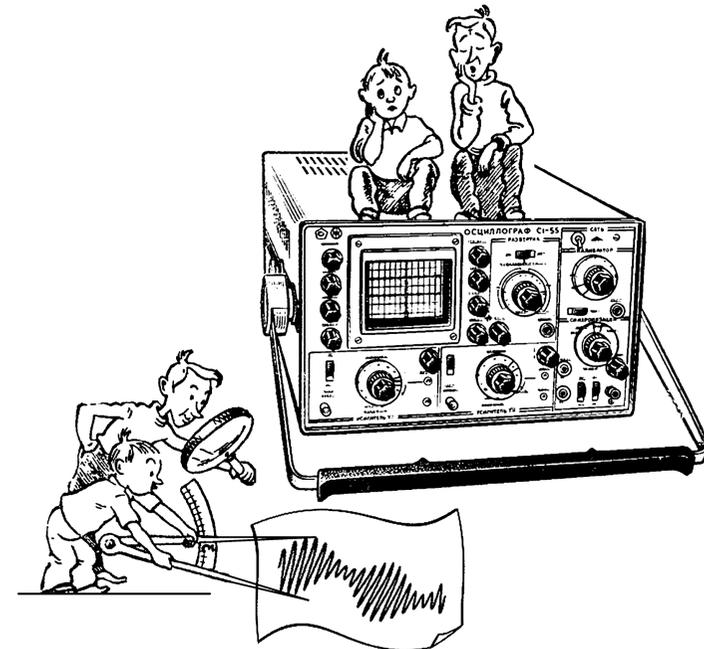
ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"

Кафедра радиотехники

354-2015

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 3 - 4
по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы"
для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника"
(профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и
обработки сигналов") очной формы обучения



Воронеж 2015

Составители: д-р техн. наук А.В. Останков,
канд. техн. наук В.П. Дубыкин

УДК 621.37

Методические указания к лабораторным работам № 3 - 4 по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы" для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника" (профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов") очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. А.В. Останков, В.П. Дубыкин. Воронеж, 2015. 43 с.

Методические указания содержат описание двух работ, входящих в лабораторный практикум по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы" и относящихся к разделам "Активные линейные радиотехнические цепи" и "Активные нелинейные радиотехнические цепи". Лабораторные работы ориентированы на выполнение методом физического моделирования на лабораторных стендах.

Табл. 7. Ил. 22. Библиогр.: 3 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. В.П. Литвиненко

Ответственный за выпуск зав. кафедрой канд. техн. наук,
доц. Б.В. Матвеев

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный
технический университет", 2015

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Основной целью лабораторных занятий по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы" является проверка, углубление и закрепление основных теоретических положений, приобретение новых знаний практического характера, освоение методики ведения экспериментальных исследований, получения навыков работы с измерительной аппаратурой, вычислительной техникой и современными программами математического моделирования.

Рабочей программой дисциплины "Радиотехнические цепи и сигналы" предусматривается выполнение 12-ти лабораторных работ – 4 работы в пятом и 8 работ в шестом семестрах. Описание работ № 3 и 4 содержится в настоящем руководстве, остальных – в руководствах других изданий.

Перед непосредственным выполнением каждой лабораторной работы студент обязан выполнить домашнее задание. Выполнению экспериментальной части лабораторной работы предшествует процедура допуска – проверки подготовленности студента, в том числе и домашнего задания.

Приступать к выполнению экспериментальных исследований можно только после разрешения преподавателя, соблюдая при этом правила техники безопасности. По окончании работы необходимо предъявить результаты исследований преподавателю. После одобрения преподавателем полученных результатов следует выключить базовый блок установки и измерительные приборы, привести в порядок рабочее место.

Защита каждой лабораторной работы предполагает объяснение полученных экспериментальных результатов, ответы на теоретические вопросы и решение микрозадач, связанных с тематикой проведённых исследований. Зачёт по проделанной работе должен быть получен до начала следующей лабораторной работы.

Лабораторная работа № 3

ВРЕМЕННЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ

Цель работы — экспериментально исследовать связь между параметрами импульсной и амплитудно-частотной характеристик линейных радиотехнических цепей на примере фильтров нижних частот (ФНЧ); выявить отличия характеристик реальных фильтров от характеристик идеального ФНЧ.

Краткие теоретические сведения

Фильтром нижних частот принято называть линейную радиотехническую цепь, предназначенную для передачи на выход с минимальным ослаблением колебания, частоты которого не превосходят частоты среза (F_C) фильтра. В то же время колебания с более высокими частотами в ФНЧ должны существенно ослабляться (рис. 1).

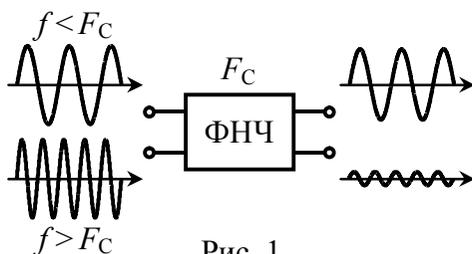


Рис. 1

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи $K(f)$ представляет собой зависимость от частоты отношения амплитуды выходного гармонического колебания в установившемся режиме к амплитуде гармонического колебания на входе цепи. Типичные АЧХ реальных ФНЧ показаны на рис. 2,а. Частота среза АЧХ фильтра нижних частот (F_C) ограничивает сверху диапазон частот, в пределах которого значения АЧХ от-

личаются от максимального значения не более чем в $\sqrt{2}$ раз. Интервал частот с верхней граничной частотой F_C есть полоса пропускания ФНЧ по уровню 0.707 или "минус" 3 дБ.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) цепи $\varphi(f)$ — зависимость от частоты разности фаз выходного и входного гармонических колебаний в установившемся режиме цепи. Типичные ФЧХ реальных ФНЧ показаны на рис. 2,б. Наклон ФЧХ определяет время запаздывания (t_3) гармонических составляющих сигнала в цепи.

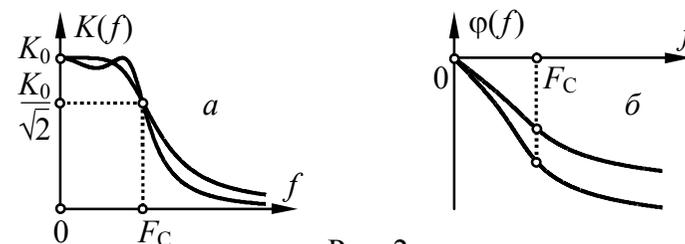


Рис. 2

Дельта-импульсом называют сигнал (рис. 3,а), описываемый δ -функцией: $S_\delta(t) = S_0 \cdot T \cdot \delta(t)$, где S_0 и T — амплитудный и временной коэффициенты; $\delta(t) = \{\infty, t=0; 0, t \neq 0\}$, причём площадь δ -функции полагается равной единице. Дельта-импульс служит для математического описания реальных сигналов. Применительно к конкретной цепи сигнал, например, прямоугольный импульс (рис. 3,б) может быть заменён дельта-импульсом, если его длительность T существенно меньше интервала времени, характеризующего продолжительность переходных процессов в цепи ($T \ll t_3$ или $T \ll \tau_{ц}$, где $\tau_{ц}$ — постоянная времени цепи). Если рассуждать с частотных позиций, то ширина спектра сигнала Δf , претендующего на роль дельта-импульса, должна значительно превышать полосу пропускания цепи ($\Delta f \gg F_C$).

Импульсной характеристикой (ИХ) называют нормированный отклик $g(t)$ линейной цепи на дельта-импульс при нулевых начальных условиях. Типичная ИХ ФНЧ показана на рис. 4.

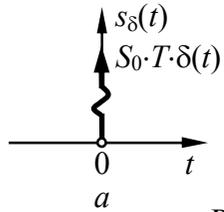


Рис. 3

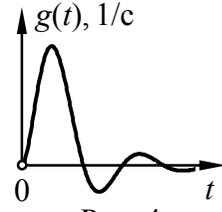
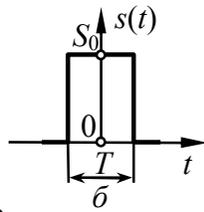


Рис. 4

Импульсная характеристика цепи связана с комплексным коэффициентом передачи цепи обратным преобразованием Фурье:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t} df = \int_{-\infty}^{\infty} K(f) \cdot e^{j\varphi(f)} \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t} df,$$

откуда следует, что АЧХ цепи $K(f)$ совпадает со спектральной плотностью амплитуд импульсной характеристики цепи. Это означает, например, что расширение (сужение) полосы пропускания ФНЧ приводит к сжатию (соответственно расширению) импульсной характеристики цепи.

Характеристики идеального ФНЧ (АЧХ, ФЧХ и ИХ) изображены на рис. 5. Ниже приведены соответствующие этим характеристикам аналитические выражения:

$$K_{\text{ИФНЧ}}(f) = \begin{cases} K_0, & \text{при } f \in [0, F_C], \\ 0, & \text{при } f \notin [0, F_C], \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{ИФНЧ}}(f) = -2\pi \cdot f \cdot t_3 \text{ при } f \in [0, F_C],$$

$$g_{\text{ИФНЧ}}(t) = 2K_0 \cdot F_C \cdot \text{sinc}[2\pi \cdot F_C \cdot (t - t_3)]. \quad (2)$$

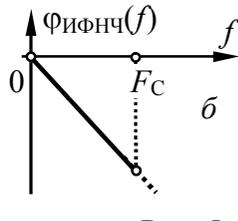
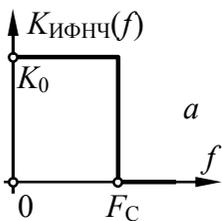
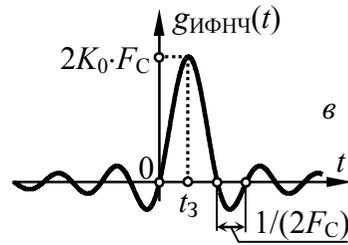


Рис. 5



Из рис. 5,б видно, что импульсная характеристика ИФНЧ на интервале времени, предшествующем моменту воздействия дельта-импульса ($t=0$), отлична от нуля ($g_{\text{ИФНЧ}}(t) \neq 0$ при $t < 0$). Это свидетельствует о нереализуемости идеального ФНЧ.

Описание лабораторной установки

Работа выполняется на сменном блоке, верхняя панель которого изображена на рис. 6. Блок содержит запускаемый извне генератор отсчётных импульсов (ГОИ), формирующий периодически повторяющиеся пачки из 32-х коротких импульсов (отсчётов) с формой, близкой к прямоугольной. Амплитуду и полярность первых 20-ти импульсов можно регулировать с помощью потенциометров. Последние 12 импульсов отсутствуют для визуального разделения соседних пачек друг от друга. Запуск ГОИ осуществляется гармоническим сигналом внешнего лабораторного генератора, подключаемого к клеммам Γ_1 базового блока. Частота внешнего сигнала определяет частоту следования отсчётных импульсов. В данной работе ГОИ используется для генерации периодически повторяющегося одиночного импульса малой длительности, имитирующего дельта-импульс и подаваемого на вход ФНЧ для измерения импульсной

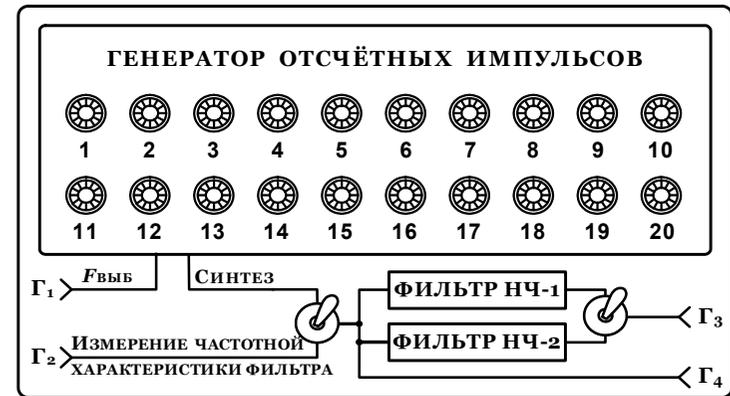


Рис. 6

характеристики. При измерении АЧХ ФНЧ используется только внешний лабораторный генератор. В этом случае он должен быть подключен к клеммам Γ_2 (при этом левый тумблер на панели сменного блока переводится в нижнее положение). Величины входного и выходного напряжений ФНЧ фиксируются с помощью внешнего вольтметра.

Сменный блок (рис. 6) содержит трёхзвенный LC -фильтр ("Фильтр НЧ-1") и однозвенный RC -фильтр ("Фильтр НЧ-2"), используемые в работе в качестве исследуемых ФНЧ. Принципиальные электрические схемы фильтров приведены на рис. 7. Сигнал с выхода фильтра (НЧ-1 или НЧ-2 в зависимости от положения правого тумблера на панели сменного блока) поступает на клеммы Γ_3 . На клеммы Γ_4 выводится сигнал, действующий на входе фильтров, на клеммы Γ_5 – импульсы, предназначенные для внешней синхронизации осциллографа, используемого для регистрации импульсных характеристик ФНЧ.

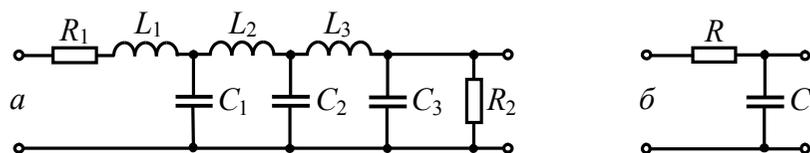


Рис. 7

Подготовительное (домашнее) задание

1. Расчёт частотных характеристик ФНЧ

Изобразить принципиальную электрическую схему RC -фильтра (рис. 7,б) и рассчитать его АЧХ по формуле

$$K(f) = 1 / \sqrt{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau_{RC})^2},$$

где $\tau_{RC} = R \cdot C$ – постоянная времени RC -фильтра, полагая, что $R = 560$ Ом, $C = 120$ нФ, а частота меняется в пределах от нуля до 8 кГц. Изобразить график АЧХ. Найти расчётное значение частоты среза RC -фильтра $F_C = 1 / (2\pi \cdot \tau_{RC})$, внести его в отчёт.

Изобразить принципиальную электрическую схему LC -фильтра (рис. 7,а). Получить в схемотехническом симуляторе АЧХ LC -фильтра, полагая, что $R_1 = 135$ Ом, $L_1 = 26,5$ мГн, $L_2 = 26,0$ мГн, $L_3 = 13,0$ мГн, $C_1 = 200$ нФ, $C_2 = 100$ нФ, $C_3 = 39$ нФ, $R_2 = 390$ Ом. За основу взять схемный файл симулятора Electronics Workbench к работе 1, изложенной в [3]. Изобразить график нормированной АЧХ в одной системе координат с АЧХ RC -фильтра. Определить частоту среза F_C , внести ее в отчёт.

Построить в масштабе нормированную АЧХ идеального ФНЧ с частотой среза 3,5 кГц в одной системе координат с АЧХ RC - и LC -фильтров. Сравнить характеристики.

2. Расчёт временных характеристик ФНЧ

Рассчитать нормированную импульсную характеристику RC -фильтра нижних частот по формуле

$$\bar{g}_{RC}(t) = \exp(-t/\tau_{RC}).$$

Изобразить график импульсной характеристики на интервале времени от нуля до 100 мкс, полагая предел шкалы времени, равным 600 мкс.

Получить в схемотехническом симуляторе импульсную характеристику LC -фильтра, пронормировать ее значения и изобразить график в одной системе координат с характеристикой RC -фильтра. Определить время между началом характеристики и ее наибольшим максимумом и считать его временем запаздывания t_3 сигнала в фильтре.

Рассчитать значения нормированной импульсной характеристики идеального ФНЧ с частотой среза $F_C = 3.5$ кГц:

$$\bar{g}_{\text{ИФНЧ}}(t) = \text{sinc}[2\pi \cdot F_C \cdot (t - t_3)]$$

Время запаздывания t_3 взять таким, чтобы максимум $\bar{g}_{\text{ИФНЧ}}(t)$ совпал по времени с пиком импульсной характеристики LC -фильтра. Нанести характеристику поверх остальных, сопоставить ее с другими характеристиками, сделать выводы.

**Лабораторные задания
и методические указания по их выполнению**

Таблица 1

1. Исследование частотных характеристик ФНЧ

Включить измерительные приборы: генератор АНР-1001, вольтметр АВМ-1071, осциллограф АСК-1021*. Дать приборам прогреться. Левый тумблер на панели сменного блока перевести в нижнее положение "Измерение частотной характеристики фильтра", правый тумблер — в верхнее положение "Фильтр НЧ-1" (*LC*-фильтр). Частоту гармонических колебаний генератора установить равной 1 кГц, амплитуду — 5...10 В. Для АНР-1001, у которого встроенный вольтметр отсутствует, указанная амплитуда колебаний соответствует почти крайнему правому положению регулятора "Амплитуда".

Напряжение от генератора АНР-1001 подать на клеммы Γ_2 базового блока. К клеммам Γ_3 подключить вольтметр, соединённый параллельно с осциллографом. Убедиться в наличии напряжения на выходе фильтра (по вольтметру), проанализировать его форму (по осциллографу).

Изменяя частоту колебания на входе фильтра в пределах от 20 Гц до 8 кГц с шагом 0,25 кГц (при $f < 4$ кГц) или 0,5 кГц ($f > 4$ кГц), фиксировать для каждого значения частоты по вольтметру, подключенному к клеммам Γ_3 , уровень напряжения на выходе ($U_{\text{вых}}$) и, сразу же переключая вольтметр к клеммам Γ_4 , — на входе ($U_{\text{вх}}$) *LC*-фильтра. Результаты измерений внести в табл. 1. Искомые значения АЧХ $\tilde{K}(f)$ определять отношением $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$. Результаты расчёта $\tilde{K}(f)$ внести в табл. 2. Разделить полученные значения $\tilde{K}(f)$ на максимальное значение измеренной АЧХ, внести полученные значения нормированной АЧХ $\bar{K}(f)$ исследуемого *LC*-фильтра в табл. 1.

* Описание указанных измерительных приборов и рекомендации по работе с ними приведены в приложении.

Экспериментальная АЧХ *LC*-фильтра

f , кГц	0.02	0.25	0.50	0.75	1.00	...	4.00	4.50	5.00	...
$U_{\text{вых}}$, В										
$U_{\text{вх}}$, В										
$\tilde{K}(f)$										
$\bar{K}(f)$										

Правый тумблер на панели сменного блока перевести в нижнее положение "Фильтр НЧ-2" (*RC*-фильтр). Снять амплитудно-частотную характеристику *RC*-фильтра. Результаты внести в таблицу, аналогичную табл. 1.

Построить друг под другом в одинаковом масштабе графики нормированных АЧХ *LC*- и *RC*-фильтра. Нанести поверх экспериментальных кривых соответствующие расчётные АЧХ, полученные в домашнем задании. Сравнить расчётные АЧХ с экспериментальными. Сделать вывод, объяснить расхождение. По экспериментальным АЧХ определить частоту среза f_c каждого фильтра — граничную частоту полосы пропускания по уровню 0,707 от максимума АЧХ. Результаты внести во 2-й столбец табл. 2. В 4-й столбец табл. 2 внести расчётные значения частот среза фильтров из домашнего задания, сравнить их значения с экспериментально найденными. Сопоставить АЧХ фильтров, указать, какой из фильтров наиболее близок к идеальному ФНЧ.

Таблица 2

Частота среза АЧХ исследуемых фильтров

Тип фильтра	Найденная экспериментально		Расчётное значение
	по АЧХ	по ИХ	
1	2	3	4
<i>LC</i> -фильтр			
<i>RC</i> -фильтр			

2. Исследование временных характеристик ФНЧ

Левый тумблер на панели сменного блока перевести в положение "Синтез", правый тумблер — в верхнее положение "Фильтр НЧ-1" (LC -фильтр). На клеммы Γ_1 базового блока подать от внешнего генератора гармоническое колебание с частотой 30 кГц и амплитудой 5...10 В. К клеммам Γ_4 подключить осциллограф, используя для его синхронизации напряжение с клемм Γ_5 . Чувствительность осциллографа установить равной "1 В/дел", длительность развёртки — "0.1 мс/дел". Вольтметр выключить. Несколько потенциометров на панели сменного блока выкрутить в крайнее правое положение и добиться появления на экране осциллографа пачки импульсов. Для снижения искажений уменьшить амплитуду поступающего на клеммы Γ_1 сигнала до наименьшего уровня, при котором ещё наблюдается устойчивая генерация импульсов. Задействовав потенциометры, уменьшить до нуля амплитуды *всех* формируемых импульсов, *кроме первого*; амплитуду первого импульса увеличить до максимального значения. При этом не рекомендуется выкручивать потенциометр до упора в крайнее правое положение — это может привести к перегрузке ГОИ, сопровождаемой уширением формируемого импульса, а не увеличением его амплитуды. Переключить осциллограф к клеммам Γ_3 , увеличить в двадцать раз чувствительность по его входу (0.05 В/дел).

Снять по точкам, пронормировать и зафиксировать* в отчёте наблюдаемую на экране осциллографа импульсную характеристику LC -фильтра. Измерить интервал времени Δt между нулями бокового лепестка характеристики (рис. 8,а) и, полагая, что характеристика близка к идеальной, оценить частоту среза

* Учитывая наличие у большинства студентов мобильных телефонов с цифровыми камерами, рекомендуется приводить в отчёте не рисунки, а *фотографии* осциллограмм. При этом обязательно следует оцифровать деления вертикальной и горизонтальной оси приведённых на фотографии сигналов.

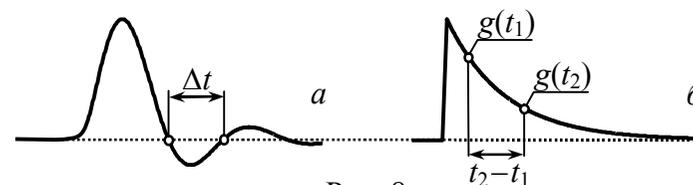


Рис. 8

фильтра по формуле: $\tilde{F}_C = 1/(2\Delta t)$. Внести в 3-й столбец табл. 2 найденное таким способом значение \tilde{F}_C и сравнить со значением, полученным по АЧХ. Сделать вывод о связи параметров временной и частотной характеристик фильтра. Нанести поверх экспериментально снятой характеристики расчётную, полученную в домашнем задании. Сравнить их, сделать вывод.

Переключить правый тумблер на панели сменного блока в нижнее положение "Фильтр НЧ-2", получить и снять импульсную характеристику RC -фильтра, пронормировать её и привести в отчёте. По двум точкам зафиксированной характеристики (рис. 8,б) оценить постоянную времени фильтра:

$$\tilde{\tau}_{RC} = \frac{t_2 - t_1}{\ln[g(t_1)/g(t_2)]}$$

а затем и частоту среза $\tilde{F}_C = 1/(2\pi \cdot \tilde{\tau}_{RC})$. Внести найденное таким способом значение \tilde{F}_C в 3-й столбец табл. 2, сравнить с ранее полученными значениями. Нанести поверх экспериментально снятой характеристики расчётную, полученную в домашнем задании. Сделать вывод. Прокомментировать степень соответствия импульсных характеристик LC - и RC -фильтра.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Дайте определение импульсной характеристики цепи. Изложите методику её расчёта и экспериментального измерения. Каково практическое содержание этой характеристики?

2. Что такое переходная характеристика цепи? Как её рассчитать, располагая принципиальной схемой цепи? Как снять

экспериментально? Как связаны между собой переходная и импульсная характеристики?

3. Что такое амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики цепи? С какой целью их определяют? Какова методика расчёта и экспериментального измерения этих характеристик? Связаны ли друг с другом АЧХ и ФЧХ цепи?

4. Какую цепь называют фильтром нижних частот? Что такое частота среза АЧХ и полоса пропускания ФНЧ. Изобразите АЧХ и ФЧХ реального ФНЧ.

5. Изобразите качественно АЧХ и ФЧХ идеального ФНЧ, обозначьте координаты характерных точек характеристик. Что определяет наклон ФЧХ идеального ФНЧ? частота среза АЧХ?

6. Изобразите две импульсные характеристики идеального ФНЧ, соответствующие двум АЧХ, отличающимся частотой среза. Как поведёт себя ИХ фильтра, если частота среза АЧХ фильтра будет неограниченно возрастать? устремится к нулю?

7. Как скажется на импульсной характеристике идеального ФНЧ изменение наклона его ФЧХ? увеличение коэффициента передачи в пределах полосы пропускания?

8. В чём заключается принципиальное различие импульсных характеристик реального ФНЧ и идеального? Сформулируйте условие физической реализуемости цепи.

9. Изобразите качественно АЧХ и ФЧХ RC -фильтра нижних частот, укажите координаты их характерных точек. Чем отличаются эти характеристики от характеристик идеального ФНЧ? Как скажется на частотных характеристиках RC -фильтра увеличение сопротивления R ? уменьшение ёмкости C ?

10. При каких условиях реакцию линейной радиотехнической цепи на одиночный прямоугольный импульс можно считать импульсной характеристикой цепи? Пояснения дайте, исходя из двух позиций – временной и частотной.

Литература: [1, с. 65-68; 216-217; 570; 647-648],
[2, с. 193-199].

Лабораторная работа № 4

НЕЛИНЕЙНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ И УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Цель работы — исследовать нелинейное резонансное усиление и умножение частоты в режиме с отсечкой тока и установить зависимость качественных показателей усилителя (умножителя) от уровней управляющих напряжений на входе.

Краткие теоретические сведения

При воздействии на нелинейное сопротивление переменного напряжения ток в сопротивлении может существенно отличаться по форме от напряжения. Связано это с появлением в спектре тока новых спектральных составляющих. Так, при гармоническом характере приложенного напряжения в спектре тока помимо колебания с частотой входного воздействия присутствуют многочисленные гармоники с кратными частотами и постоянная составляющая. Если ток нелинейного сопротивления, в качестве которого использован активный элемент (транзистор), пропустить через полосовой фильтр, настроенный на частоту входного воздействия и обладающий относительно малой полосой пропускания, то выходное напряжение такого устройства будет практически совпадать по форме с приложенным напряжением, но существенно превышать его по мгновенным значениям. Такое устройство, работая в нелинейном режиме, будет осуществлять практически линейное усиление напряжения.

На рис. 9 показана упрощённая схема нелинейного усилителя на биполярном транзисторе (с общим эмиттером). В качестве выходного полосового фильтра использован простой параллельный колебательный контур, резонансная частота ω_r которого совпадает с частотой ω_0 входного напряжения, а полоса пропускания P_ω существенно меньше резонансной частоты ω_r .

Предполагается, что такой резонансный усилитель работает в режиме большого сигнала, при котором проходную ВАХ транзистора – зависимость тока коллектора i_K от напряжения между базой и эмиттером u_B – целесообразно аппроксимировать кусочно-линейной функцией с начальным напряжением U_H и крутизной S . Аппроксимированная таким образом характеристика $i_K(u_B)$ представлена графически на рис. 10. Теоретический анализ схемы усилителя, приведённой на рис. 9, показывает, что если на базу транзистора с кусочно-линейной проходной характеристикой помимо напряжения смещения U_{B0} подать напряжение гармонической формы $u_B(t) = U_B \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$, то при достаточно большой амплитуде U_B усиливаемого напряжения коллекторный ток $i_K(t)$ приобретает форму усечённых косинусоидальных импульсов. Эти импульсы изображены качественно на рис. 10. Половина длительности основания импульсов, выраженная в угловой мере, определяет величину угла отсечки тока Θ ; при известном напряжении U_H начала наклонного луча ВАХ, постоянного смещения U_{B0} и амплитуды усиливаемого колебания U_B величину угла отсечки можно рассчитать по формуле

$$\Theta = \arccos \frac{U_H - U_{B0}}{U_B}, \quad (3)$$

полагая, что $U_B \geq |U_H - U_{B0}|$. Из соотношения (3) следует, что на практике существует три способа управления углом отсечки: 1) изменением напряжения смещения U_{B0} при фиксированной амплитуде U_B ; 2) вариацией амплитуды входного напряжения U_B при неизменном смещении U_{B0} ; 3) одновременным изменением U_{B0} и U_B .

Так как форма коллекторного тока явно негармоническая, но периодическая ($T_\omega = 2\pi/\omega_0$), то его можно считать состоящим из множества гармонических составляющих с частотами $n \cdot \omega_0$,

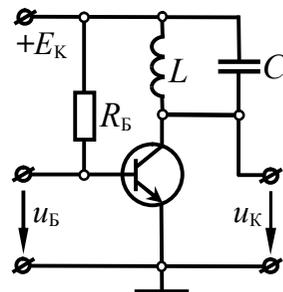


Рис. 9

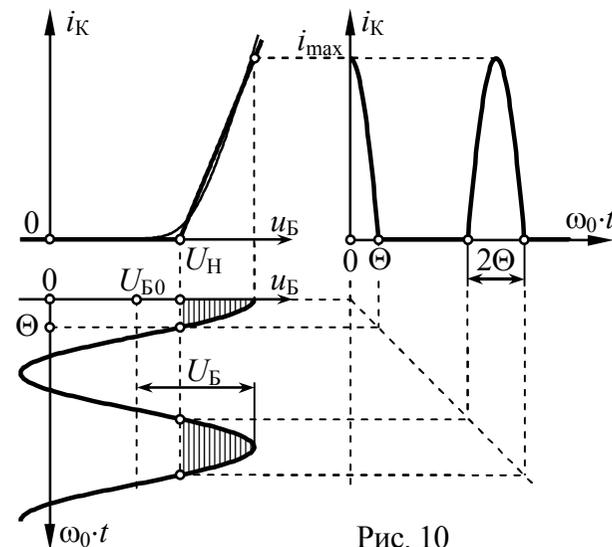


Рис. 10

где $n = 0, 1, 2, \dots$. Можно показать, что амплитуды гармоник I_{Kn} коллекторного тока нелинейным образом зависят от амплитуды U_B усиливаемого напряжения и могут быть рассчитаны как

$$I_{Kn} = S \cdot U_B \cdot |\gamma_n(\Theta)|, \quad (4)$$

где $\gamma_n(\Theta)$ – коэффициенты (Берга) разложения импульсов тока (рис. 11):

$$\gamma_n(\Theta) = \frac{2}{\pi \cdot n \cdot (n^2 - 1)} \cdot [\sin(n \cdot \Theta) \cdot \cos \Theta - n \cdot \cos(n \cdot \Theta) \cdot \sin \Theta],$$

показывающие как изменяются амплитуды гармоник тока в зависимости от угла отсечки Θ при фиксированной амплитуде воздействия U_B и управлении углом отсечки за счёт вариации напряжения смещения U_{B0} .

Соотношение (4) справедливо лишь для недонапряжённого режима работы усилителя, при котором вершины импульсов тока $i_K(t)$ совпадают по форме с гармонической функцией в области её максимальных значений, как показано на рис. 10. В недонапряжённом режиме амплитуда напряжения на выходе

усилителя, контур которого точно настроен на частоту входного напряжения ω_0 и обладает большой добротностью, прямо пропорциональна амплитуде первой гармоники I_{K1} коллекторного тока i_K и может быть рассчитана в соответствии с выражением:

$$U_K = I_{K1} \cdot R_{KЭ}, \quad (5)$$

где $R_{KЭ}$ – сопротивление эквивалентного контура на резонансной частоте.

При малой величине минимальных мгновенных значений напряжения на коллекторе $u_{K\text{мин}} = E_K - U_K$ (при большой амплитуде U_B напряжения на базе) транзистор может войти в режим насыщения (рис. 12); режим работы усилителя, соответствующий такой ситуации, называется перенапряжённым. В перенапряжённом режиме появляется провал в вершине импульсов тока; следствием этого является прекращение роста амплитуды первой гармоники тока I_{K1} при увеличении амплитуды входного напряжения U_B . Последнее свидетельствует о том, что энергетические ресурсы активного элемента исчерпаны, и ника-

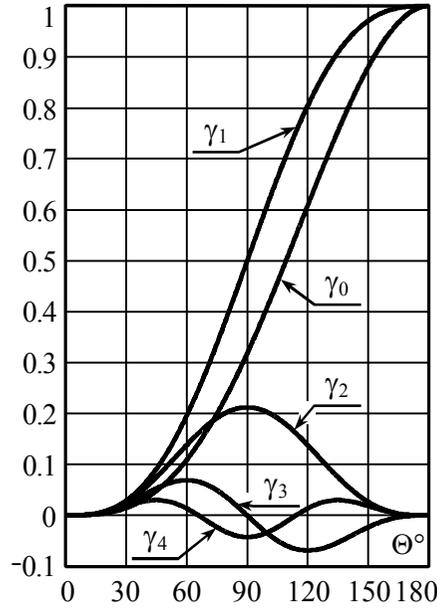


Рис. 11

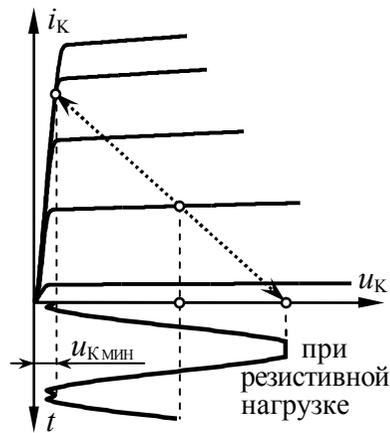


Рис. 12

кое дальнейшее увеличение амплитуды сигнала на входе усилителя не может привести к увеличению амплитуды напряжения U_K на выходе усилителя. Граничным недонапряжённым и перенапряжённым режимам является критический режим работы усилителя, который наступает при достижении амплитудой коллекторного напряжения величины $U_{K\text{пред}} = \xi \cdot E_K$, где $\xi = 0.85 \dots 0.95$ – коэффициент использования напряжения.

Влияние амплитуды усиливаемого напряжения U_B на качественные показатели нелинейного усилителя с резонансной нагрузкой принято оценивать колебательной характеристикой. Колебательная характеристика резонансного усилителя – зависимость амплитуды выходного колебания первой гармоники (I_{K1} или чаще напряжения на контуре $U_K \sim I_{K1}$) от амплитуды U_B усиливаемого напряжения при настройке контура на частоту ω_0 первой гармоники. Для расчёта характеристики необходимо располагать параметрами аппроксимации (S, U_H) динамической проходной ВАХ транзистора, т.е. зависимости выходного тока i_K от напряжения на входе u_B при наличии в выходной цепи колебательного контура. Такой характеристики, как правило, нет в распоряжении исследователя. Однако если полагать, что сопротивление контура $R_{KЭ}$ мало по сравнению с выходным дифференциальным сопротивлением R_i транзистора, то в недонапряжённом режиме расчёт колебательной характеристики можно производить на основе параметров статической ВАХ.

Если напряжение смещения меньше напряжения излома ВАХ ($U_{B0} < U_H$, рис. 13,а), то при малой амплитуде U_B воздействия, такой что $U_B \leq U_H - U_{B0}$, выходной ток отсутствует ($I_{K1} = 0$) и $U_K = 0$. При дальнейшем увеличении амплитуды усиливаемого сигнала ($U_B > U_H - U_{B0}$) появляется выходной ток с отсечкой. Амплитуда первой гармоники тока определяется выражением (4), так что амплитуда напряжения на контуре

$$U_K = S \cdot R_{KЭ} \cdot \gamma_1(\Theta) \cdot U_B,$$

где $\gamma_1(\Theta) = (1/\pi) \cdot (\Theta - \sin\Theta \cdot \cos\Theta)$.

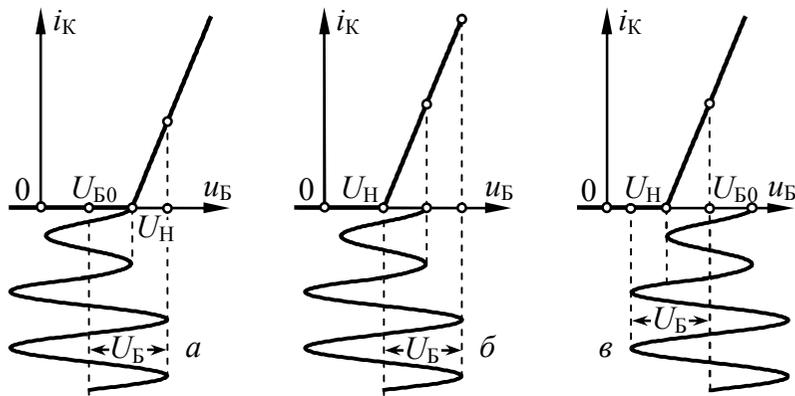


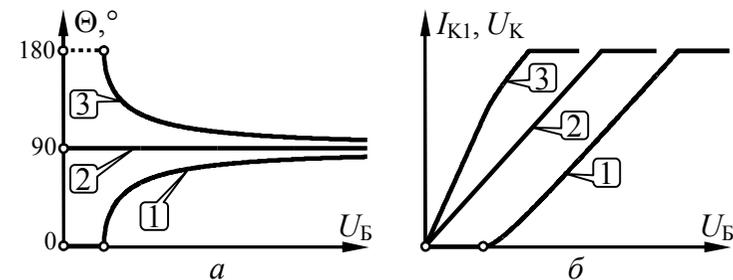
Рис. 13

С ростом амплитуды U_B угол отсечки Θ увеличивается (от 0 вплоть до 90° , рис. 14,а, поз. 1), наклон колебательной характеристики в недонапряжённом режиме также растёт (от 0 до $S \cdot R_{кЭ} \cdot \gamma_1(90^\circ) = 0.5 \cdot S \cdot R_{кЭ}$), так что её форма отличается от линейной, особенно на начальном участке (рис. 14,б, поз. 1). В перенапряжённом режиме колебательная характеристика равномерна; её уровень определяется предельной амплитудой $\xi \cdot E_K$ первой гармоники выходного колебания.

Если напряжение смещения совпадает с напряжением излома ВАХ ($U_{B0} = U_H$, рис. 13,б), то при любой амплитуде усиливаемого колебания угол отсечки тока равен 90° (рис. 14,а, поз. 2), а колебательная характеристика усилителя в недонапряжённом режиме $U_K = 0.5 S \cdot R_{кЭ} \cdot U_B$ абсолютно линейна (рис. 14,б, поз. 2).

При расположении исходной рабочей точки непосредственно на наклонном луче проходной ВАХ активного элемента ($U_{B0} > U_H$) усилитель работает в линейном режиме до тех пор, пока $U_B \leq U_{B0} - U_H$ (рис. 13,в). Отсечка тока при этом отсутствует ($\Theta = 180^\circ$, рис. 14,а, поз. 3), а колебательная характеристика усилителя $U_K = S \cdot R_{кЭ} \cdot U_B$ линейна и имеет максимально возможный наклон (рис. 14,б, поз. 3). Увеличение амплитуды колебания на входе ($U_B > U_{B0} - U_H$) приводит к появлению отсечки тока (угол

Θ уменьшается от 180° до 90°), наклон колебательной характеристики усилителя $U_K = S \cdot R_{кЭ} \cdot \gamma_1(\Theta) \cdot U_B$ при этом уменьшается. Наконец, превышение входной амплитуды критической величины переводит усилитель в перенапряжённый режим работы.



1 - $U_{B0} < U_H$; 2 - $U_{B0} = U_H$; 3 - $U_{B0} > U_H$

Рис. 14

Итак, рассчитать колебательную характеристику нелинейного резонансного усилителя можно по формуле:

$$U_K = \begin{cases} 0 & \text{при } U_{B0} < U_H \text{ и } U_B \leq U_H - U_{B0}, \\ S \cdot R_{кЭ} \cdot U_B & \text{при } U_{B0} > U_H \text{ и } U_B \leq U_{B0} - U_H, \\ S \cdot R_{кЭ} \cdot \gamma_1(\Theta) \cdot U_B & \text{при } |U_{B0} - U_H| < U_B \leq U_{БКР}, \\ \xi \cdot E_K & \text{при } U_B > U_{БКР}, \end{cases} \quad (6)$$

где $U_{БКР}$ – амплитуда напряжения на базе, соответствующая переходу усилителя в критический режим. Увеличение напряжения смещения приводит к росту средней крутизны колебательной характеристики в недонапряжённом режиме и уменьшению амплитуды входного колебания $U_{БКР}$, при которой усилитель переходит в перенапряжённый режим.

Коэффициент усиления K резонансного усилителя — отношение амплитуды выходного колебания (определяемой первой гармоникой тока) к амплитуде напряжения на входе в установленном режиме и отсутствии расстройки:

$$K(U_B) = U_K / U_B. \quad (7)$$

В нелинейном усилителе, работающем в недонапряжённом режиме, коэффициент усиления K неявно зависит от амплитуды усиливаемого напряжения U_B (через угол отсечки Θ):

$$K = S \cdot R_{кЭ} \cdot \gamma_1(\Theta) \text{ при } |U_{Б0} - U_H| < U_B \leq U_{Бкр}.$$

В перенапряжённом режиме коэффициент усиления обратно пропорционален амплитуде входного напряжения: $K = \xi \cdot E_K / U_B$. Зависимость $K(U_B)$ может быть рассчитана по известной колебательной характеристике усилителя $I_{к1}(U_B)$ или $U_K(U_B)$. Качественные зависимости коэффициента усиления от амплитуды усиливаемого напряжения для разных напряжений смещения показаны на рис. 15 (1 – $U_{Б0} < U_H$; 2 – $U_{Б0} = U_H$; 3 – $U_{Б0} > U_H$).

Для реализации режима умножения частоты в n раз (частота выходного напряжения $u_K(t)$ при этом в n раз больше частоты входного напряжения $u_B(t)$) следует настроить контур на частоту $n \cdot \omega_0$, изменением напряжения смещения обеспечить оптимальный по коэффициенту передачи n -й гармоники угол отсечки ($\Theta_{опт n} = 180^\circ/n$); при этом амплитуда напряжения на контуре, определяемая амплитудой n -й гармоники тока $I_{кн}$, будет максимальной (рис. 11). Максимальный коэффициент передачи умножителя определяется выражением:

$$K_{n \max} = S \cdot R_{кЭ n} \cdot \gamma_n(\Theta_{опт n}), \quad (8)$$

где $R_{кЭ n}$ – сопротивление эквивалентного контура n -й гармонике.

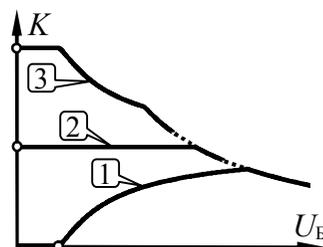


Рис. 15

Описание лабораторной установки

Работа выполняется с использованием сменного блока, верхняя панель которого показана на рис. 16.

Исследуемая цепь представляет собой транзисторный резонансный усилитель, питаемый от источника с напряжением

$E_K = 6.3$ В. Величина ёмкости C_K конденсатора, включенного в контур определяется положением "Переключателя C_K ". Напряжение смещения на базе транзистора регулируется ручкой "Смещение $U_{Б0}$ " и измеряется индикатором, размещённым на передней панели базового блока (предел шкалы равен 2 В). Усиливаемое напряжение частотой 150...200 кГц подаётся от внешнего генератора на клеммы Γ_1 . Напряжение с выхода усилителя поступает на клеммы Γ_5 при переводе переключателя "Осциллограф" в положение "А". Уровень входного напряжения усилителя следует фиксировать внешним вольтметром на клеммах Γ_4 базового блока, для этого переключатель "Вольтметр" должен быть переведён в положение " Γ_1 " (рис. 16).

В работе предусмотрена возможность замены резонансной нагрузки (контура) резистивной (сопротивлением R) с помощью тумблера T_1 . Это даёт возможность наблюдать (в противоположной полярности) осциллограммы коллекторного тока.

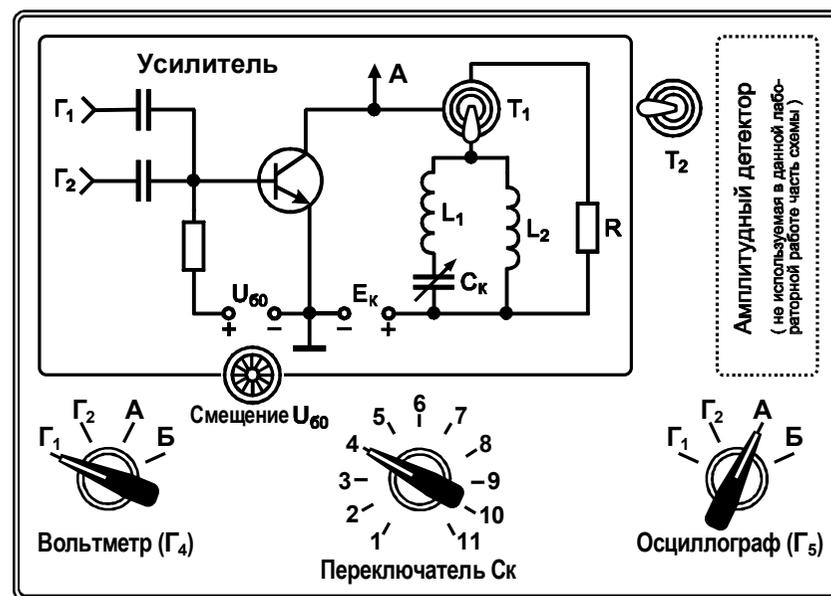


Рис. 16

Подготовительное (домашнее) задание

1. Начертить исследуемую в работе схему нелинейного усилителя и указать назначение её элементов.

Полагая, что режим работы усилителя недонапряжённый, нарисовать предполагаемую форму импульсов выходного напряжения при резистивной нагрузке для углов отсечки тока 180, 120, 90 и 60°. Изобразить предполагаемую форму напряжения на выходе усилителя применительно к резонансной нагрузке для тех же значений углов отсечки коллекторного тока.

По заданному начальному напряжению проходной вольт-амперной характеристики транзистора $U_H = 0.6$ В рассчитать искомые значения напряжения смещения U_{B0} , при которых обеспечиваются углы отсечки выходного тока 180, 120, 90 и 60°, полагая, что ко входу усилителя приложено гармоническое напряжение амплитудой $U_B = 0.4$ В. Результаты расчёта внести в табл. 3.

Полагая, что режим работы усилителя является перенапряжённым, нагрузка – резистивной, а угол отсечки тока равным 120°, изобразить предполагаемую форму импульсов напряжения на выходе усилителя.

Таблица 3

Угол отсечки, °	Смещение U_{B0} , В	
	расчёт	эксперим.
180		
120		
90		
60		

2. По заданной крутизне S проходной характеристики транзистора, её начальному напряжению $U_H = 0.6$ В и сопротивлению нагрузки усилителя $R_{KЭ}$ (табл. 4) для трёх значений напряжения смещения $U_{B0} = 0.4, 0.6, 0.8$ В рассчитать и построить колебательные характеристики нелинейного резонансного усилителя (расчёт следует производить по формуле (6), полагая, что амплитуда входного напряжения U_B принимает значения из интервала 0...1.2 В). Результаты расчёта внести в табл. 5.

Указать амплитуды входного напряжения, при которых возникает критический режим ($U_{БКР}$).

Таблица 4

См. блок	S , мА/В	$R_{KЭ}$, кОм	"С _К "	См. блок	S , мА/В	$R_{KЭ}$, кОм	"С _К "	См. блок	S , мА/В	$R_{KЭ}$, кОм	"С _К "
1	1.3	10.2	1	6	1.0	13.4	6	8	1.2	10.6	1
2	1.2	12.2	2	7	1.0	13.7	7	9	1.4	10.2	1
3	1.3	12.6	3	8	1.1	11.7	8	10	1.1	13.2	3
4	1.2	12.5	4	9	1.1	13.0	9	11	1.4	11.7	4
5	1.4	11.2	5	10	1.5	10.4	10	12	1.4	12.3	5

Таблица 5

U_B , В		0	0.05	0.10	0.20	...				
U_K , В при $U_{B0} = \dots$	0.4 В									
	0.6 В									
	0.8 В									

3. Используя результаты расчётов по п. 2 построить графические зависимости коэффициента усиления усилителя от амплитуды напряжения на базе $K(U_B) = U_K/U_B$ для трёх значений напряжения смещения 0.4, 0.6 и 0.8 В.

Амплитуды входного колебания, при которых обеспечиваются наибольшие значения коэффициента усиления, зафиксировать. Указать соответствующие им значения коэффициента усиления.

4. Полагая, что контур в составе нелинейного усилителя настроен на частоту второй (третьей) гармоники выходного тока (режим удвоения (утроения) частоты), рассчитать напряжение смещения, которое при начальном напряжении $U_H = 0.6$ В и амплитуде напряжения на входе $U_B = 0.4(0.8)$ В, обеспечивает оптимальный по коэффициенту передачи второй (третьей) гармоники угол отсечки.

Для недонапряжённого режима работы удвоителя (утроителя) по заданной крутизне S и сопротивлению нагрузки $R_{KЭ}$ (табл. 4) рассчитать его максимальный коэффициент передачи.

Лабораторные задания и методические указания по их выполнению

1. Исследование формы импульсов выходного напряжения при резистивной и резонансной нагрузках

Включить и прогреть измерительные приборы: генератор (АНР-1001), вольтметр (АВМ-1071), осциллограф (АСК-1021).

Подготовить сменный блок к работе: тумблер "Т₂" переключить в левое положение, тумблер "Т₁" – в нижнее положение "Контур"; переключатель "Вольтметр" перевести в положение "Г₁", переключатель "Осциллограф" – в положение "А", переключатель "Ск" – в положение, соответствующее табл. 4.

Подготовить генератор: частоту гармонических колебаний установить равной 150 кГц, амплитуду колебаний уменьшить до нуля; подключить генератор к клеммам Г₁ базового блока. Подготовить к работе осциллограф и подключить его (вместе с параллельно соединённым вольтметром) к клеммам Г₄.

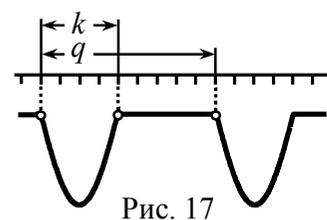
Включить питание базового блока. Ручкой "Смещение $U_{Б0}$ " установить по индикатору базового блока напряжение смещения на базе транзистора равным $U_{Б0} = 0.8$ В. Увеличить напряжение на входе усилителя (выходе генератора) до 50 мВ, фиксируя его уровень по вольтметру, подключенному к клеммам Г₄. Переключить вольтметр с осциллографом к выходу усилителя (клеммам Г₅). Увеличивая частоту колебаний генератора от 150 до 200 кГц, подобрать такое её значение, чтобы амплитуда выходных колебаний, наблюдаемых на экране осциллографа, была максимальной, что соответствовало бы настройке в резонанс. Далее частоту генератора не менять.

Переключить вольтметр ко входу усилителя (клеммам Г₄) и по его показаниям увеличить амплитуду входного напряжения до расчётной величины $U_{Б} = 0.4$ В. Следует учесть, что шкала вольтметра проградуирована в действующих значениях, то есть амплитуде 0.4 В должно соответствовать значение 283 мВ,

отсчитываемое по шкале. Переключить вольтметр с осциллографом к выходу усилителя (клеммам Г₅), тумблером "Т₁" включить резистивную нагрузку.

Изменяя напряжение смещения на базе транзистора, установить по осциллограмме выходного напряжения усилителя (оно совпадает по форме с импульсами коллекторного тока) углы отсечки тока последовательно 180, 120, 90 и 60°. Зарисовать* импульсы напряжения для каждого угла отсечки. Внести в табл. 3 найденные значения напряжения смещения, соответствующие этим углам отсечки, сравнить их с расчётными.

Примечание: Пусть осциллограмма выходного напряже-



ния выглядит так, как показано на рис. 17; тогда, установленное значение угла отсечки тока составляет $180^\circ \cdot k/q$, где k, q — число делений шкалы экрана осциллографа, определяющее длительность импульса с отсечкой и период колебаний.

Переключить тумблер "Т₁" в положение "Контур". Устанавливая поочередно напряжение смещения, соответствующее углам отсечки 180, 120, 90 и 60°, зарисовать осциллограммы напряжения на контуре и указать его амплитуду. Сравнить форму импульсов коллекторного тока и напряжения на контуре.

Тумблером "Т₁" вновь включить резистивную нагрузку. Получить перенапряжённый режим работы усилителя. Для этого установить напряжение смещения 0.8 В, частоту усиливаемого напряжения — 1...2 кГц. Постепенно увеличивая амплитуду усиливаемого напряжения, добиться провала в верхней (с учётом инверсии по фазе – нижней) части импульсов напряжения. Снять осциллограмму напряжения.

* Рекомендуется приводить в отчёте фотографии осциллограмм сигналов. Деления вертикальных и горизонтальных осей должны быть оцифрованы.

2. Исследование колебательных характеристик нелинейного резонансного усилителя

Переключить тумблер "Т₁" в положение "Контур". Установить напряжение смещения $U_{Б0} = 0.4$ В, частоту входных колебаний — равной резонансной частоте усилителя.

Снять колебательную характеристику усилителя. Для этого увеличивать амплитуду $U_{Б}$ усиливаемого напряжения от 0 до 1.5 В с шагом не более 50-100 мВ и фиксировать соответствующие значения амплитуды $U_{К}$ выходного напряжения (на контуре). Установку уровня $U_{Б}$ входного напряжения и измерение амплитуды $U_{К}$ выходного напряжения следует производить с помощью вольтметра, подключая его *попеременно* к клеммам Г₄ (вход) и Г₅ (выход) соответственно. Учесть, что показания вольтметра соответствуют действующим, а не амплитудным значениям напряжения. Результаты измерений внести в таблицу, аналогичную табл. 5.

Снять колебательные характеристики ещё для двух значений напряжения смещения $U_{Б0} = 0.6$ и 0.8 В. Результаты измерений внести в таблицу. Начертить экспериментальные колебательные характеристики отдельно, а также в одной системе координат с расчётными. Сделать выводы.

По колебательным характеристикам оценить амплитуды входного напряжения $U_{Бкр}$, при которых наступает критический режим. Сравнить с теоретическими результатами.

Дать рекомендации по выбору номинального режима работы усилителя (предложить рациональные значения напряжения смещения, амплитуды усиливаемого напряжения).

3. Исследование зависимости коэффициента усиления усилителя от амплитуды входного напряжения

Используя результаты эксперимента, полученные в предыдущем разделе, рассчитать зависимости коэффициента уси-

ления K усилителя от амплитуды $U_{Б}$ входного напряжения для трёх значений напряжения смещения (0.4, 0.6 и 0.8 В). Полученные зависимости начертить отдельно, а также нанести поверх расчётных. Дать физическое толкование полученным данным. Прокомментировать соответствие теории и эксперимента.

Для трёх значений напряжения смещения определить наибольшие значения коэффициентов усиления, которые может обеспечить усилитель; амплитуды входного колебания, соответствующие этим значениям, зафиксировать. Полученные данные сравнить с теоретическими.

4. Исследование удвоителя частоты

Переключить вольтметр ко входу усилителя (клеммам Г₄) и по его показаниям установить амплитуду входного напряжения 0.4 В (действующее значение 283 мВ). Переключить вольтметр к выходу усилителя (клеммам Г₅). Установить напряжение смещение $U_{Б0} = 0.6$ В. Уменьшить частоту входного напряжения усилителя так, чтобы частота второй гармоники выходного тока совпала с резонансной частотой контура.

Изменяя напряжение смещения на базе транзистора, добиться максимума амплитуды напряжения на выходе удвоителя частоты. Зафиксировать оптимальную величину смещения, измерить соответствующую амплитуду выходного напряжения. Зарисовать в одном временном масштабе осциллограммы входного и выходного напряжений удвоителя. По значениям амплитуд входного и выходного напряжений оценить коэффициент передачи удвоителя частоты. Экспериментальные данные сравнить с расчётными. Сделать выводы.

Включить тумблером "Т₁" резистивную нагрузку и зарисовать осциллограмму выходного напряжения удвоителя. Определить по осциллограмме угол отсечки тока, сравнить его величину с расчётной. Сделать вывод.

5. Исследование утроителя частоты

Переключить тумблер "Т₁" в положение "Контур". Установить амплитуду входного напряжения усилителя равной 0.8 В (действующее значение 566 мВ). Уменьшить частоту напряжения на входе так, чтобы частота третьей гармоники выходного тока совпала с резонансной частотой контура.

Изменяя напряжение смещения, добиться максимума напряжения на выходе утроителя частоты. По значениям амплитуд входного и выходного напряжений определить величину коэффициента передачи утроителя частоты. Найденные значения оптимального напряжения смещения и коэффициента передачи утроителя зафиксировать и сравнить с расчётными.

Зарисовать в одном временном масштабе осциллограммы входного и выходного напряжений утроителя частоты. Заменить резонансную нагрузку резистивной и вновь зарисовать осциллограмму выходного напряжения. По осциллограмме напряжения при резистивной нагрузке определить угол отсечки и сравнить его с расчётным значением. Сделать выводы.

Контрольные вопросы к защите работы

1. В каких случаях реальную характеристику транзистора, отображающую зависимость коллекторного тока от напряжения между базой и эмиттером, целесообразно аппроксимировать кусочно-ломаной функцией? Какими параметрами при этом будет описываться ВАХ транзистора?

2. Что такое угол отсечки тока? Как меняется угол отсечки в нелинейном усилителе с изменением напряжения смещения? амплитуды напряжения, подаваемого на вход усилителя? одновременного изменения обоих напряжений?

3. Каким образом можно регулировать угол отсечки, сохраняя неизменной амплитуду усиливаемого напряжения? пиковое значение импульсов коллекторного тока? Из каких сооб-

ражений выбирается угол отсечки в резонансном усилителе, работающем при больших уровнях входного сигнала?

4. Чем определяется выходное напряжение нелинейного резонансного усилителя? Как можно рассчитать амплитуду этого напряжения? Как она изменится, если увеличить напряжение смещения? уменьшить амплитуду усиливаемого напряжения? Пояснения дайте с использованием понятия угла отсечки.

5. Изобразите временные диаграммы коллекторного тока в недонапряжённом, критическом и перенапряжённом режимах нелинейного резонансного усилителя. Из каких соображений обеспечивается тот или иной режим работы усилителя?

6. Почему временные диаграммы коллекторного тока и напряжения на контуре в нелинейном режиме существенно отличаются друг от друга? Изобразите качественно спектры выходного тока и напряжения на контуре. В чём их отличие?

7. Что такое колебательная характеристика нелинейного резонансного усилителя? В чём её практическое содержание? Как рассчитать и экспериментально снять эту характеристику?

8. Чем отличаются колебательные характеристики нелинейного резонансного усилителя, построенные для углов отсечки $\Theta = 90^\circ$, $\Theta < 90^\circ$ и $\Theta > 90^\circ$? Изобразите их качественно.

9. Изобразите колебательные характеристики нелинейного резонансного усилителя, соответствующие двум разным значениям: а) напряжения смещения; б) напряжения источника питания; в) резонансного сопротивления контура.

10. Изобразите зависимости коэффициента усиления нелинейного усилителя от амплитуды усиливаемого напряжения U_B для разных значений напряжения смещения. Почему при неограниченном росте U_B коэффициент усиления падает до нуля?

11. Можно ли так выбрать положение рабочей точки на проходной ВАХ транзистора нелинейного усилителя, что в составе коллекторного тока будут отсутствовать гармоники нечётных номеров? чётных номеров?

12. Каковы энергетические преимущества нелинейного режима работы резонансного усилителя по сравнению с линейным? Изобразите зависимость коэффициента полезного действия усилителя от угла отсечки.

13. Изобразите временные диаграммы напряжения между базой и эмиттером, напряжения между коллектором и эмиттером и коллекторного тока при: а) усилении гармонического напряжения; б) удвоении частоты; в) утроении частоты.

14. Как следует выбирать угол отсечки в умножителе частоты для обеспечения максимального коэффициента передачи при работе: а) с фиксированной амплитудой подаваемого напряжения; б) с фиксированной величиной пика импульсов тока?

15. Каков принцип работы нелинейного умножителя частоты? Почему трудно добиться высокой кратности умножения?

Литература: [1, с. 321-323; 326-332],
[2, с. 275-285].

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ НАТУРНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

П.1. Рабочее место в лаборатории

Лабораторные работы выполняются на специально выделенном рабочем месте, на котором размещены лабораторный стенд и радиоизмерительные приборы: генератор стандартный сигналов АНР-1001, генератор звуковой частоты ГЗ-33, милливольтметр АВМ-1071 и двухканальный осциллограф АСК-2021.

Стенд состоит из двух блоков – базового и сменного. В базовом блоке (рис. П.1) находятся источники постоянного напряжения питания, управляющих и синхронизирующих сигналов, а также стрелочный индикатор, используемый для измерения регулируемых постоянных напряжений. Клеммы для подключения радиоизмерительных приборов к различным точкам исследуемой цепи располагаются на левой (клеммы Г₁, Г₂) и правой (клеммы Г₃ ÷ Г₅) боковых панелях базового блока.

Сменные блоки для разных лабораторных работ различны, они содержат индивидуальные цепи и органы управления. На верхней панели сменного блока изображена принципиальная или структурная схема цепи и располагаются ручки регуляторов, переключатели и тумблеры. На рис. П.2 показан сменный блок к работам № 1 и 7.

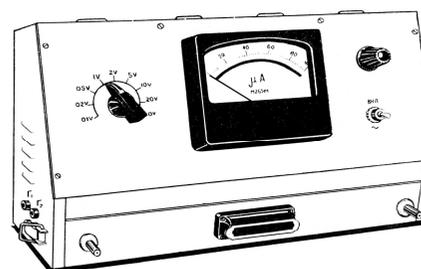


Рис. П.1

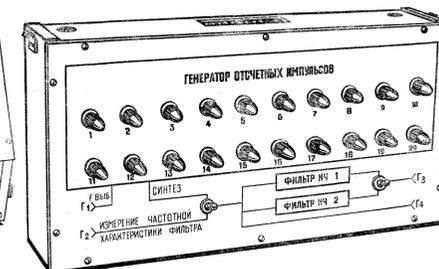


Рис. П.2

П.2. Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ

1. Каждый, приступающий к выполнению лабораторного практикума, должен ознакомиться с содержанием настоящих указаний, получить дополнительный инструктаж от преподавателя и расписаться о том в журнале по технике безопасности.

2. Все работы в лаборатории должны проводиться только с разрешения преподавателя, ведущего занятия.

3. Перед началом работы необходимо детально ознакомиться с электрической схемой, органами управления установки и приборов. При отсутствии заземления лабораторного стенда и измерительных приборов, нарушении целостности сетевых шлангов выполнять работу запрещается.

4. Запрещается самостоятельно вставлять в розетку и извлекать из неё штепсельную вилку сетевого шланга установки или какого-либо используемого измерительного прибора.

5. Сборка лабораторной установки (подключение съёмного блока, измерительных приборов и т. п.) должна производиться только при выключенном напряжении сети.

6. Запрещается производить регулировки и переключения органов управления базового и съёмного блоков, измерительных приборов, касаясь одновременно (второй рукой) заземлённых металлических конструкций или оборудования.

7. Запрещается оставлять без надзора оборудование рабочего места под напряжением.

8. Запрещается оставаться в лаборатории и выполнять лабораторную работу одному.

9. Не следует загромождать свое рабочее место. Предметы, не имеющие отношения к выполнению работы, не должны располагаться на рабочем столе.

10. В случае возникновения неисправности стенда или измерительных приборов необходимо немедленно отключить сетевое напряжение и сообщить о случившемся преподавателю.

11. В случае поражения одного из работающих электрическим током любой другой из находящихся в лаборатории должен немедленно выключить рубильник силовой сети лаборатории и сообщить о случившемся преподавателю.

П.3. Описание измерительных приборов и рекомендации по работе с ними

П.3.1. Генератор-частотомер АНР-1001

Генератор позволяет формировать периодические колебания гармонической, прямоугольной и треугольной (пилообразной) формы в диапазоне частот от 0.2 Гц до 2 МГц с амплитудой напряжения от 250 мВ до 20 В и возможностью изменения скважности. Прибор имеет встроенный частотомер с дисплеем, который обеспечивает измерение частоты генерируемого или внешнего сигнала в диапазоне от 5 Гц до 10 МГц.

Основные технические характеристики прибора:

- генерируемая частота по диапазонам: 1 – 0,2...2,0 Гц; 10 – 2...20 Гц; 100 – 20...200 Гц; 1К – 0,2...2,0 кГц; 10К – 2...20 кГц; 100К – 20...200 кГц; 1М – 0,2...2,0 МГц;
- относительная погрешность установки частоты – $\pm 1\%$;
- скважность сигналов – от 40 до 1;
- амплитуда выходного сигнала: от 0.25 до 10 В (при нагрузке 50 Ом); от 0.5 до 20 В (без нагрузки);
- выходное сопротивление – 50 Ом;
- чувствительность в режиме измерения частоты внешнего сигнала – не хуже 30 мВ;
- погрешность измерения частоты – ± 1 единица младшего разряда;
- возможность качания частоты генерируемого сигнала с глубиной до 1000:1.

Вид передней панели прибора показан на рис. П.3, назначение органов управления описано в табл. П.1.

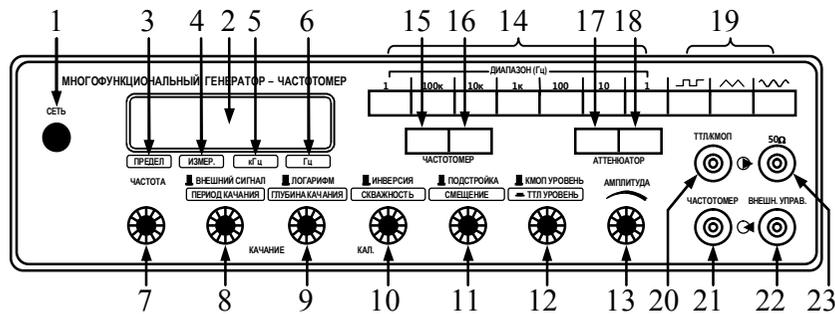


Рис. П.3

Таблица П.1

Поз.	Наименование и назначение органа управления
1	"Сеть" – кнопка включения питания прибора
2	Цифровой дисплей – отображает частоту сигнала
3	"Предел" – индикатор переполнения (выхода измеряемой частоты за пределы диапазона частотомера)
4	"Измер." – индикатор измерения частоты
5,6	"кГц", "Гц" – индикатор единиц частоты
7	"Частота" – ручка плавного изменения частоты
8	"Внешний сигнал /Период качания" – регулятор периода свипирования. В вытянутом положении качание частоты осуществляется внешним сигналом
9	"Логарифм /Глубина качания" – регулятор глубины свипирования. В вытянутом положении обеспечивается логарифмический закон глубины качания частоты
10	"Инверсия/Скважность" – регулятор скважности сигнала. В вытянутом положении инвертирует выходной сигнал
11	"Подстройка/Смещение" – определяет полярность и величину смещения постоянной составляющей сигнала
12	"КМОП уровень/ТТЛ уровень" – устанавливает выходной сигнал ТТЛ, в вытянутом положении – КМОП уровня
13	"Амплитуда" – ручка плавного регулирования амплитуды выходного сигнала (диапазон – 40 дБ)
14	Каждая из семи кнопок (1М, 100к, 10к, 1к, 100, 10, 1) устанавливает диапазон регулировки частоты сигнала

Поз.	Наименование и назначение органа управления
15	"Частотомер: Внешн./Внутр." – выбор режима измерения частоты: генерируемых колебаний (при отжатой кнопке) или внешнего источника сигналов (при нажатой кнопке)
16	"Частотомер: 0 дБ /–20 дБ" – выбор уровня чувствительности частотомера: 300 мВ (–20 дБ) при нажатой кнопке, 30 мВ (0 дБ) – при отпущенной
17,18	"Аттенюатор: –40 дБ /–20 дБ" – уровень ослабления выходного сигнала –40 дБ (17) или –20 дБ (18)
19	Три кнопки выбора формы генерируемого сигнала: гармонической, треугольной и прямоугольной
20	"ТТЛ/КМОП, " – выходное гнездо импульсного генератора сигналов ТТЛ и КМОП уровня
21	"Частотомер, вход " – вход частотомера для сигнала от внешнего источника (импеданс – не менее 500 кОм)
22	"Внешн. управ." – входное гнездо для осуществления качания частоты генератора внешним источником сигнала
23	"50 Ω" – выходное гнездо генератора для сигналов гармонической, треугольной и прямоугольной формы

При работе прибора в качестве генератора используется выходное гнездо "50 Ω" (23). После включения питания кнопкой "Сеть" (1) выбирается форма генерируемого сигнала (одна из кнопок 19) и диапазон регулировки частоты (одна из кнопок 14). Конкретное значение частоты колебаний устанавливается ручкой регулятора "Частота" (7) по показаниям дисплея частотомера (2), а амплитуды сигнала – ручкой регулировки "Амплитуда" (13). Все остальные кнопки, в том числе 15...18, должны быть отпущены (не нажаты), ручки регулировок 8...12 – наоборот нажаты (втянуты) и выкручены в крайнее левое положение.

При использовании прибора для измерения частоты внешнего сигнала используется гнездо "Частотомер, вход" (21); кнопка "Частотомер: Внешн./Внутр." (15) должна быть нажата.

П.3.2. Аналоговый милливольтметр АВМ-1071

Милливольтметр АВМ-1071 предназначен для измерения переменного напряжения в диапазоне 100 мкВ...100 В. Прибор имеет стрелочную индикацию и позволяет производить измерения в частотном диапазоне до 1 МГц.

Технические характеристики прибора:

– пределы измерения (12 шт.): 300 мкВ / 1 / 3 / 10 / 30 / 100 / 300 мВ / 1 / 3 / 10 / 30 / 100 В;

– диапазон рабочих частот – 10 Гц...2 МГц (для гармонического сигнала);

– погрешность измерения: $\pm 3\%$ (на частотах 20 Гц...20 кГц) и $\pm 8\%$ (на частотах 20 кГц...1 МГц);

– дополнительная погрешность, обусловленная изменением напряжения питания ($\pm 10\%$) – $\pm 0.5\%$;

– входной импеданс: 1 МОм / 50 пФ (300 мкВ...300 мВ), 8 МОм / 20 пФ (1 В...100 В);

– шумы – не более 3% полной шкалы.

На передней панели прибора (рис. П.4) размещены:

1) стрелочный индикатор, имеющий две шкалы измерения напряжения (первая сверху – для диапазонов кратных 10, вторая сверху – для диапазонов кратных 3-м), шкалу измерения относительного уровня по напряжению в дБ (третья сверху, опорный уровень 1 В), шкалу относительного уровня передачи по мощности в дБм (нижняя, опорный уровень 1 мВт на 600 Ом); индикатор снабжён калибровочным винтом (позиция 5);

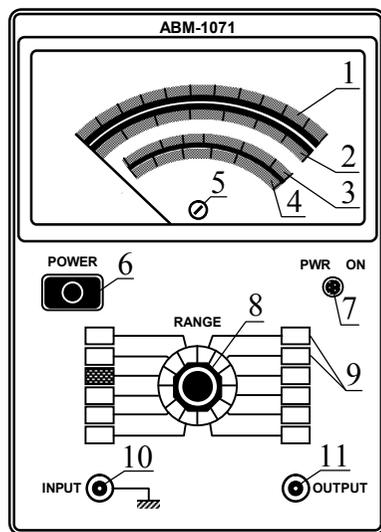


Рис. П.4

2) выключатель (позиция 6) и светодиодный индикатор питания (позиция 7);

3) дисковый переключатель (позиция 8) диапазонов измерения (позиция 9);

4) входная клемма (позиция 10);

5) выходная клемма (позиция 11), к которой можно подключить дополнительное оборудование, например, осциллограф; напряжение на клемме – $0.1 \cdot U_{\text{изм}}$ ($\pm 10\%$).

Работа с прибором заключается в следующем. Установить стрелку индикатора в нулевую позицию с помощью калибровочного винта, дисковый переключатель диапазонов измерений перевести в положение "100 В" (максимальный предел). Включить и прогреть прибор в течение 15-ти минут. Подать сигнал на вход. Уменьшать предел до тех пор, пока стрелка не будет отклонена от верхнего предела более чем на треть шкалы.

П.3.3. Осциллограф двухканальный АСК-1021

Осциллограф двухканальный аналоговый АСК-1021 предназначен для исследования формы и измерения амплитудно-временных параметров одного или двух периодических сигналов с частотами 0...25 МГц путем их визуального наблюдения. На лицевой панели осциллографа (рисунок П.5) расположен люминесцентный экран для визуального отображения сигналов, ряд переключателей, обеспечивающих изменение чувствительности по двум каналам, длительности развертки, задания требуемого режима синхронизации, а также гнезда для подачи исследуемых сигналов и сигнала синхронизации. На панели справа от экрана выделено несколько областей.

Две одинаковые симметрично расположенные области, объединенные надписью "VERTICAL" (рисунок П.5) дают возможность управлять по вертикали лучами в канале 1 (CH1) и в канале 2 (CH2). В каждой из этих двух областей имеется: — гнездо "1 МΩ 25 pF" для подключения входного кабеля;

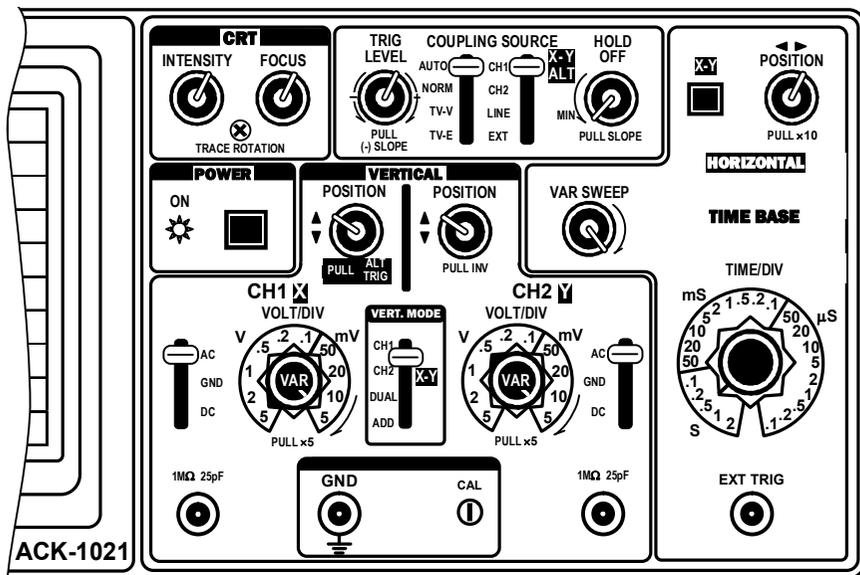


Рис. П.5

- переключатель на три позиции: AC (пропускается только переменная составляющая входного напряжения), GND (отключение входного напряжения), DC (вход открыт для постоянной составляющей входного напряжения).
- переключатель "VOLT/DIV" масштаба канала по вертикали (чувствительности канала) от 5 В/дел (крайнее левое положение) до 5 мВ/дел (крайнее правое положение);
- красная ручка "VAR" на этом же переключателе масштаба обеспечивает увеличение чувствительности канала в пять раз при её вытягивании; поворотом ручки можно плавно изменять чувствительность и размер изображения по вертикали; следует иметь в виду, что установленный масштаб по вертикали верен, только если ручка "VAR" повернута по часовой стрелке до упора (щелчка); перед измерениями необходимо удостовериться, что ручка находится именно в этом положении;
- ручка "POSITION" для плавного перемещения изображения вверх или вниз без изменения размера; если ручку канала 1 вытя-

нуть, то реализуется режим попеременного запуска развёртки напряжениями в каналах 1 и 2, при котором изображения этих напряжений будут неподвижны, даже если их частоты не кратны; если вытянуть на себя ручку в канале 2, то изображение сигнала в канале 2 будет инвертировано;

Между рассмотренными областями располагается область с переключателем "VERT. MODE" на четыре позиции:

- CH1 – на экране отображается сигнал на входе канала 1;
- CH2 – на экране отображается сигнал на входе канала 2;
- DUAL – на экране отображаются сигналы на обоих входах;
- ADD – изображение есть сумма сигналов на входах каналов или их разность, если напряжение в канале 2 инвертировано.

Область "HORIZONTAL" справа относится к временной развёртке (TIME BASE). Она содержит:

- переключатель "TIME/DIV" масштаба по горизонтали от 2 с/дел (крайнее левое положение) до 0,1 мкс/дел (крайнее правое положение);
- ручка "VAR SWEEP", с помощью которой можно плавно сжимать изображение по горизонтали; установленный по горизонтали масштаб верен, только если эта ручка повернута по часовой стрелке до упора; перед измерениями следует убедиться, что ручка находится в этом положении;
- ручка "POSITION" для плавного перемещения изображения вправо или влево без изменения размера; если ручку вытянуть, то изображение растягивается в 10 раз;
- кнопка "X-Y" для установления режима отображения фигур Лиссажу и выключения временной развёртки входных напряжений; при использовании временной развёртки следует убедиться, что эта кнопка не нажата.

Область без заголовка, расположенная сверху панели и по центру, относится к синхронизации и содержит:

- переключатель "COUPLING" на четыре позиции: AUTO (автоколебательный режим генератора развёртки, при котором нет необходимости в запускающем импульсе), NORM (ждушая

развёртка, при которой генератору развёртки для выполнения цикла необходим запускающий синхроимпульс), TV-V и TV-H (для наблюдения телевизионных сигналов);

— переключатель "SOURCE" с позициями: CH1 (внутренняя синхронизация сигналом в канале 1), CH2 (внутренняя синхронизация сигналом в канале 2), LINE (внутренняя синхронизация сетевым напряжением), EXT (внешняя синхронизация).

— ручка плавной регулировки уровня запуска "TRIG LEVEL" для обеспечения такого уровня сигнала, по достижении которого начинается очередной цикл ждущей развёртки; если её вытянуть, то запуск будет производиться не задним фронтом импульса, а передним;

— ручка плавной регулировки паузы между следующими друг за другом циклами развёртки "HOLD OFF"; при её повороте против часовой стрелки пауза уменьшается, а яркость изображения повышается, так как луч чаще пробегает по своему пути на экране; увеличение паузы может понадобиться при исследовании сложно изменяющихся напряжений; при минимальной паузе на экране может иметь место эффект наложения третьего; если ручку вытащить, то каналы 1 и 2 будут быстро переключаться и изображение двух сигналов на экране будет пунктирным; этот режим имеет смысл использовать на низких частотах исследуемых сигналов, когда обычное, более медленное переключение даёт мелькание изображений;

В области "POWER" располагается красная кнопка для включения осциллографа, после которого начинает светиться красный индикатор "ON".

В области "CAT" расположены ручки плавной регулировки яркости (INTENSITY) и фокуса (FOCUS).

Справа внизу есть гнездо "EXT TRIG" для подключения кабеля, по которому подаётся сигнал внешней синхронизации.

В середине лицевой панели и внизу располагается гнездо "GND" для заземления корпуса осциллографа и выходное гнездо "CAL" калибровочного сигнала.

Предусмотрены три основных режима осциллографа: одноканальный, двухканальный с временной развёрткой, двухканальный режим X - Y (фигуры Лиссажу). В первых двух режимах предусмотрены различные варианты синхронизации.

Перед началом работы в любом режиме рекомендуется выполнить следующую настройку. Во-первых, отрегулировать яркость и фокус. Во-вторых, следует определённым образом установить описанные выше переключатели (табл. П.2). При работе в одноканальном режиме можно выбрать любой из двух каналов. Далее будем считать, что выбран канал 1.

Таблица П.2

Переключатель	Режим			
	Настройка	Одноканальный	Двухканальный	X-Y
AC-GND-DC (канал 1)	GND	AC или DC ¹⁾	AC или DC ¹⁾	AC или DC ¹⁾
AC-GND-DC (канал 2)	безразлично	безразлично	AC или DC ¹⁾	AC или DC ¹⁾
VERT MODE	CH1	CH1	DUAL или ADD ²⁾	CH2 (X-Y)
COUPLING	AUTO	NORM	NORM	безразлично
SOURCE	CH1	CH1 или LINE или EXT ³⁾	CH1, CH2 или LINE или EXT ⁴⁾	CH1 (X-Y)

1) Зависит от необходимости исключения или сохранения постоянной составляющей входного напряжения.

2) Зависит от необходимости видеть на экране оба входных напряжения или их сумму (разность).

3) LINE – только в случае, если частота входного напряжения кратна частоте сети; EXT – в случае, если есть импульс, опережающий исследуемый, и есть необходимость начинать развёртку с опережением.

4) CH1 или CH2 – зависит от необходимости синхронизации развёртки по напряжению в канале 1 или в канале 2; LINE – только в случае, если частоты напряжений кратны частоте сети; EXT – как в 3).

Исходное положение кнопок и ручек:
 — кнопки "POWER" и "X-Y" не нажаты;
 — все семь ручек, надписи под которыми начинаются со слова "PULL", утоплены, т. е. не вытянуты;
 — две красных ручки "VAR" в области "VERTICAL" каналов 1 и 2, а также ручка "VAR SWEEP" в области развёртки повернуты по часовой стрелке до упора (щелчка);
 — ручка "HOLD OFF" в области синхронизации повернута против часовой стрелки до упора;
 — ручки "INTENSITY", "FOCUS", все три "POSITION", а также ручка "TRIG LEVEL" установлены в среднее положение.

Настройка заключается в следующем:
 — установите переключатели в позиции, указанные в табл. П.2;
 — нажмите красную кнопку "POWER"; если всё в порядке, слева от неё должен засветиться красный индикатор "ON";
 — примерно через 20 секунд на экране должна появиться горизонтальная линия; ручкой "POSITION" в области канала 1 установите её в середине экрана.
 — ручкой "INTENSITY" отрегулируйте яркость, а ручкой "FOCUS" сфокусируйте эту линию; имейте в виду, что чем меньше яркость, тем сильнее можно сфокусировать изображение, т. е. тем тоньше будет линия и точнее измерения.

Одноканальный режим (применительно к каналу 1):
 — присоедините кабель с исследуемым напряжением к гнезду "1 MΩ 25pF" в канале 1;
 — установите переключатели в позиции, указанные в табл. П.2;
 — установите переключатель масштаба по вертикали "VOLT/DIV" в канале 1 в положение 5 В/дел, а переключатель масштаба по горизонтали "TIME/DIV" в положение 0,5 мс/дел;
 — поворачивая ручку переключателя "VOLT/DIV" по часовой стрелке, подберите такое её положение, при котором измеряемый по вертикали отрезок, например, соответствующий размаху синусоиды займёт как можно большую часть экрана по вертикали; при этом следует пользоваться ручкой "POSITION"

в канале 1 для перемещения изображения вверх или вниз без изменения размеров;
 — поворачивая ручку переключателя "TIME/DIV" в ту или другую сторону, подберите такое её положение, при котором измеряемый по горизонтали отрезок, например, соответствующий периоду синусоиды займёт как можно большую часть экрана; при этом пользуйтесь ручкой "POSITION" в области развёртки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учеб. пособие для вузов / И.С. Гоноровский. – 5-е изд., испр. и доп. — М. : Дрофа, 2006. — 719 с.
2. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] : учеб. пособие / С.И. Баскаков. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 2003. — 462 с.
3. Останков, А.В. Радиотехнические сигналы и линейные цепи для их обработки: исследование на основе имитационного моделирования [Текст] : учеб. пособие / А.В. Останков. — Воронеж : ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2008. — 161 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	1
Лабораторная работа № 3. Временные и частотные характеристики фильтров нижних частот.....	2
Лабораторная работа № 4. Нелинейное резонансное усиление и умножение частоты.....	13
Приложение	31
Библиографический список	43

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 3 - 4
по дисциплине "Радиотехнические цепи и сигналы"
для студентов направления 11.03.01 "Радиотехника"
(профиль "Радиотехнические средства передачи, приема и
обработки сигналов") очной формы обучения

Составители:

Останков Александр Витальевич,
Дубыкин Владимир Прохорович

В авторской редакции

Подписано в печать 10.07.2015.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,9. Уч.-изд. л. 2,7. Тираж 29 экз. "С" 60.

Зак. № 141.

ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический
университет"

394026 Воронеж, Московский просп., 14